

論文内容の要旨

論文題目 Observation of Large CP Violation in the Neutral B Meson System Using $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ Decay

(中性 B 中間子の $J/\psi K_L$ 崩壊を用いた大きな CP 非対称性の発見)

氏名 横山 将志

我々の住む宇宙がビッグバンによって始まったのならば、原初の宇宙では物質と反物質は厳密に同じ量だけ作られたはずである。ところが、現在の宇宙には物質のみが存在している。では反物質はどこへ消えてしまったのか？この問題を解決する鍵は、 CP 対称性の破れにあると考えられている。 CP 対称性とは、電荷などの量子数の符号を変える荷電共役変換 (C) と空間の座標系を反転させる空間反転 (P) を合わせた対称性のことで、この対称性が成り立っていれば粒子と反粒子の間に性質の違いはないことになる。素粒子物理学の初期には、素粒子間の反応では CP 対称性は完全に成り立っていると信じられていた。ところが、弱い相互作用では CP 対称性が破れていることが1964年に中性 K 中間子を使った実験によって発見された。中性 K 中間子系での CP 非対称性は0.1%程度という小さなものであるが、以来40年近くにわたる実験的努力にも関わらず、他の粒子系では CP 対称性の破れは観測されていない。このような背景から、 CP 対称性の破れの研究は現在の素粒子物理における最も重要な問題の一つとなっている。

CP 非対称性の起源について、現在最も有力と考えられているモデルは1973年に小林誠と益川敏英が提唱した理論である。このモデルは、もしクォークの種類が6種類あれば、電磁相互作用と弱い相互作用を統一した素粒子物理の「標準理論」の枠内で自然に CP 対称性の破れを導入できるというものであった。小林・益川がこの理論を提唱した当時は3種類のクォーク (u, d, s) しか知られていなかったことを考えると、このアイデアは革命的といってもよいものであったが、その後の c (1974)、 b (1977)、 t クォーク(1995)の発見により、現在では小林・益川理論は標準理論の一部として扱われるようになっている。

また、現在知られている K 中間子や B 中間子系における実験結果は、すべて小林・益川理論と矛盾しない。このことは、小林・益川理論の正しさを示唆するものであるが、一方で実験による直接的検証は十分になされているわけではない。1980年、三田一郎らは、小林・益川理論が正しいとすれば b クォークを含む B 中間子系では大きな CP 非対称性が予想されることを示した。ここで提案された CP 非保存現象の観測方法は、 B 中間子の混合と呼ばれる現象を利用したものである。中性 B 中間子と反 B 中間子は、弱い相互作用によって互いに移り変わることができる。この現象を混合と呼ぶ。三田らは、 B 中間子が直接 CP の固有状態に崩壊する確率振幅と混合して反 B 中間子になった後に崩壊する確率振幅の干渉の

効果として、大きな CP 非対称性が観測されることを予言した。

しかしこの CP 非対称性は、 10^{-4} 程度の分岐比を持つある特定の崩壊事象でしか観測できないため、その測定にはまず大量の B 中間子を作り出す必要がある。また、三田の予言した CP 非対称性は、 B 中間子と反 B 中間子の、 CP 固有状態への崩壊確率の時間分布の差として現れる。そのような非対称性を観測するためには、 B の寿命 (約 1.5 ps) よりもよい精度で測定を行う必要があり、さらに、崩壊した B 中間子がある時刻に B であったか反 B であったかを識別することが不可欠となる。

このような実験を可能にするために設計・建設されたのが KEKB と呼ばれる加速器と、Belle と呼ばれる測定器からなる KEK B -Factory である。KEKB は周長約 3 km の円形加速器で、8 GeV の電子ビームと 3.5 GeV の陽電子ビームを蓄える 2 本のリングからなっている。KEKB は大量の B 中間子を作り出せるよう、世界最高の輝度 (ルミノシティ) を持つ加速器であり、1999 年の運転開始から、2001 年夏までに 3000 万ペアを超える B 中間子対を生成した。

この大量の B 中間子の崩壊を測定し、記録するための装置が Belle と呼ばれる測定器である。Belle は様々な働きをする検出器を組み合わせて作られているが、中でも重要な働きをするのが最も内側に置かれた Silicon Vertex Detector (SVD) と呼ばれる検出器である。前述したように、 B 中間子系で CP 非対称性を観測するためには非常に短い時間での崩壊確率の時間分布を測定する必要があるが、KEK B -Factory では異なったビームエネルギーの電子と陽電子を衝突させることにより、生成された B 中間子対 (重心系ではほぼ静止している) を、実験室系において飛行させ、崩壊時間を飛行距離に変換して測定している。KEKB のビームエネルギーでは、 B 中間子、反 B 中間子は崩壊するまでに平均で約 200 μm 飛行する。この崩壊距離を測定するための検出器が SVD であり、その性能は CP 非対称性の測定精度を大きく左右する。特に、崩壊距離の測定精度を高めるためには測定器の位置の厳密な較正が不可欠であるが、我々の開発した較正用プログラムは 10 μm の精度で検出器の位置を較正することが可能であり、物理解析に十分な測定精度を達成していることが確認された。

中性 B 中間子の崩壊過程の中で、最も確実な形で CP 非対称性を観測できると予言されているのが、 $B^0(\bar{B}^0) \rightarrow J/\psi K^0$ という崩壊過程である。 K^0 には CP の固有値が異なる K_S と K_L の二種類があり、 $J/\psi K^0$ の 50% は $CP=+1$ 状態の $J/\psi K_L$ として、残りの 50% は $CP=-1$ 状態の $J/\psi K_S$ として観測される。 CP の固有値の符号によって、崩壊確率の時間分布に現れる非対称性の符号は異なる。一方、測定によるバイアスがかかるとすれば、 CP の固有値によらず時間分布に同じ非対称性を与えるはずである。従って、 $CP=+1$ 状態と $CP=-1$ 状態を両方使うことにより、測定のバイアスに対して様々なチェックを行うことが可能になる。このうち、本研究では $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ 崩壊を用いて CP 非対称性の測定を行った。 K_L は寿命が長い ($c\tau \simeq 15$ m) ため、測定器内で崩壊することはまれであり、電磁カロリメータおよび K_L/μ 検出器でのハドロンシャワーとして検出される。Belle 検出器ではハドロンシャワーのエネルギーは測定されず、その方向のみを測定する設計になっている。このため、 K_L の運動量の大きさを測定することはできないが、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ 崩壊では J/ψ の運動量を $J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-$ ($\ell = e, \mu$) 崩壊を通じて測定することができるため、この J/ψ と (方向のみがわかっている) K_L が B 中間子の 2 体崩壊によって作られたと仮定す

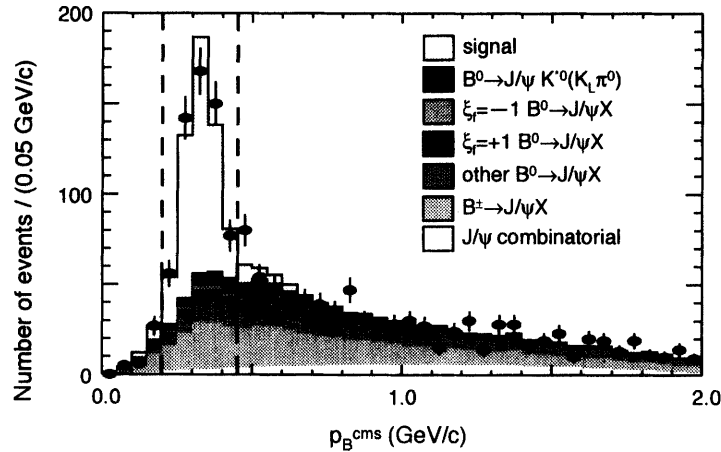


図 1: $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ 崩壊の候補事象における B 中間子の重心系での運動量分布。黒丸が実際のデータを表し、ヒストグラムはモンテカルロシミュレーションを用いて見積もった信号事象と背景事象の内訳を示す。点線は信号領域を示す。

ると、エネルギー・運動量保存則から K_L の運動量の大きさが計算できる。

K_L の運動量を直接測ることができないため、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ 崩壊以外の J/ψ を含む崩壊過程において、 K_L の候補（実際に K_L によるものと、他の粒子の相互作用を K_L と見誤る場合を含む）が存在した場合には信号事象と間違えやすい。特に、 CP の固有状態が背景事象に含まれる場合、 CP 非対称性の測定に直接偏りを生じさせることになるので、この測定において背景事象の正しい見積もりは最も重要である。背景事象は 2 体崩壊を仮定した場合の B 中間子の運動量分布の違いによって信号事象と区別できる。 $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ 崩壊による事象では B 中間子の運動量は一定値（約 330 MeV/c）のまわりにピークを作るのに対し、背景事象はよりなだらかな分布を示す。本研究ではモンテカルロシミュレーションを使って求めた信号事象・背景事象それぞれの運動量分布を実データにフィットすることにより、背景事象の割合を正しく見積もる方法を開発した。

図 1 は、2001 年 7 月までに KEKB で生成された約 3,100 万個の B 中間子・反 B 中間子ペアから選び出された $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ 崩壊の候補事象における、B 中間子の重心系での運動量分布を示す。モンテカルロシミュレーションを用いて見積もった信号事象と背景事象の内訳を重ねてある。背景事象のほとんどは $B \rightarrow J/\psi X$ という事象によるものであり、信号事象との運動量分布の違いにより識別されているのがわかる。信号領域中には 569 事象が存在し、そのうち信号事象は約 346 事象と見積もられた。

この中で、さらに崩壊距離の差が正しく測定され、 $J/\psi K_L$ に崩壊した B 中間子がある時間に B であったか反 B であったかの識別に成功した 523 事象について、 $\Upsilon(4S)$ から生成された 2 つの B 中間子の崩壊時間の差 (Δt) をプロットしたのが図 2 である。白丸（黒丸）はある時間に B（反 B）であった中間子が $J/\psi K_L$ に崩壊した場合の分布を示している。両者の分布の違いが、B 中間子において CP 対称性が破れていることを示す。小林・益川理論では、この非対称性は $\sin 2\phi_1$ というパラメータで表され、 $\sin 2\phi_1 = 0$ ならば CP 非対称性

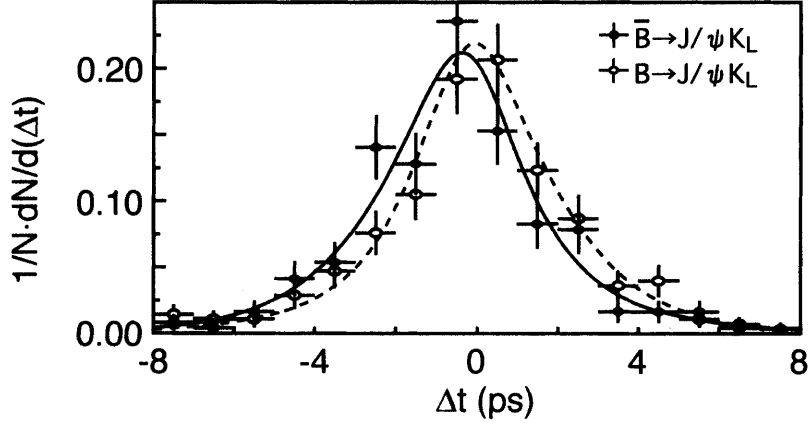


図 2: B 中間子と反 B 中間子の $J/\psi K_L$ への崩壊時間分布。黒丸と白丸の分布の差が CP 非対称性を表す。

はない。このとき、図 2 に示した崩壊時間分布は

$$\frac{dN}{d(\Delta t)} = e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}} (1 \pm \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m_d \Delta t)) \quad (1)$$

という形で表される。ここで、 τ_{B^0} は中性 B 中間子の平均寿命、 Δm_d は B 中間子の混合のパラメータであり、+符号（-符号）は B 中間子（反 B 中間子）が崩壊した場合に相当する。本研究では、背景事象の分布や実験の測定誤差による効果を取り入れた CP 非対称性の測定方法を開発し、上記の 523 事象を用いて $\sin 2\phi_1$ の値を

$$\sin 2\phi_1 = 1.31^{+0.19}_{-0.23} \pm 0.12 \quad (2)$$

と求めた。ただし、最初の誤差は統計誤差、2 つ目の誤差は系統誤差を示す。

さらに、 $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (K^{*0} \rightarrow K_S \pi^0)$ という崩壊過程を使った CP 非対称性の研究も行った。この崩壊モードでは、終状態が $CP=+1$ と $CP=-1$ の混合状態となるため、 CP 非対称性の測定のためには崩壊によって生成された粒子の角度情報を用いて $CP=+1$ 成分と $CP=-1$ 成分の割合を求める必要がある。本研究では、36 事象を用いて

$$\sin 2\phi_1 = 0.97^{+1.38}_{-1.40} \pm 0.19 \quad (3)$$

という結果を得た。

ここで得られた結果は、 5σ 以上の統計的有意性で $\sin 2\phi_1$ が有限な値を持つことを意味し、B 中間子系において CP 非対称性が大きく破れていることを示している。この結果は、K 中間子系以外で初めて CP 非保存現象を発見したものであり、小林・益川理論の正しさを強く支持するものである。また、本研究は B 中間子系において標準理論の精密検証が可能であることを実証するものであり、今後のさらなる研究に向けての第一歩となる重要な研究である。